

基于物理栖息地模拟的河道内生态流量研究

张文鸽^{1,2}, 黄 强¹, 蒋晓辉²

(1. 西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 黄河水利科学研究院水资源研究所, 河南 郑州 450003)

摘要: 结合物理栖息地模拟模型的水力学与栖息地模型, 以黄河干流兰州 - 石嘴山河段为研究样区及该河段的关键鱼种黄河鲤鱼为对象物种, 以流速及水深二水力学因子进行研究, 推求该研究样区兰州、安宁渡、下河沿、青铜峡和石嘴山五断面对象物种的流量与权重可使用面积的关系。通过对上述各断面 1975 - 1985 年汛前共 11 年生态、水文及断面资料的分析计算, 归纳出研究断面汛前适合的生态流量分别为 195、220、220、220、175 m³/s, 计算结果在 Tennant 法界定的生态流量范围之内。

关键词: 河道; 生态流量; 物理栖息地; 水深; 流速; 权重可使用面积

中图分类号: X171.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-6791(2008)02-0192-06

据 Thame^[1]在 2003 年总结, 全球有 44 个国家进行河流生态流量计算, 所用方法超过 200 种之多。这些方法可以分为 4 类: 水文学方法 (Tennant 法^[2]、日流量延时曲线法等)、水力学方法 (湿周法^[3]、R2CROSS 法等)、以生物学为基础的栖息地法 (IFIM 法^[4,5]等) 以及基于河流系统整体性理论的综合法 (BBM 法^[6,7]等), 其中水文学方法和水力学方法被广泛采纳, 计算结果也比较合理, 但遗憾的是这些方法本身缺乏物理意义。栖息地法的基本思路是通过建立河川径流与目标生物栖息地之间的关系, 探求生态流量, 因此其物理意义明确。栖息地评估法中最典型的是美国渔业及野生动物署 (U. S. Fish and Wildlife Service, USFWS) 在 1974 年研发的河道内流量增量法 (instream flow incremental methodology, IFIM 法), 该法将对象物种对栖息地流速、水深、底质及覆盖物的喜好性纳入考虑, 进而将对象物种所需流量观念, 转换成流量与栖息地之间的关系。管理者经由此定量而非定性的描述, 可从事河川保留生态流量的评估与决策。由于 IFIM 乃是一种解决问题的概念与方法, IFIM 的分析需要由 USFWS 所开发的物理栖息地模拟系统 (physical habitat simulation system, PHABSIM) 来处理。PHABSIM 是迄今最为广泛使用的栖息地评估法模型, 其分析过程为首先界定各对象物种 (如鱼类) 对栖息地重要水力学 (环境) 因子 (如水深、流速、覆盖物、底质等) 的适应度曲线 (habitat suitability curve, HSC), 然后计算河川在不同流量下各河段的水力学因子, 依此水力学因子对应栖息地适应度曲线, 即可查得对应的适应度指数 (habitat suitability index, HSI), 适应度指数与水域平面面积相乘即可推估出该水力学条件下的权重可使用栖息地面积 (weighted usable area, WUA)。

1 PHABSIM 模型简介

PHABSIM 主要由两部分构成^[8]: 水力学模型 (hydraulic model) 和栖息地模型 (habitat model), 水力学模型主要包含有对数-对数回归法 (IFG4)、渠道输送法 (MANSQ)、标准步推法 (WSP) 等方法, 其中最普遍被使用的是 IFG4 法; 栖息地模型中主要的栖息地模型为 HABTAT 法。

收稿日期: 2007-01-10

基金项目: 国家“十一五”科技攻关计划“黄河健康修复关键技术研究”(2006BAB06B08-04; 2006BAB06B06-05); 水利部现代水利科技创新项目“黄河健康生命指标体系研究”(XDS2004-03)

作者简介: 张文鸽 (1975 -), 女, 河南巩义人, 工程师, 博士研究生, 主要从事水生态及水资源研究。

E-mail: zhangwenge @yeah. net

1.1 水力学模型

水力学模型的主要功能在于计算横断面各种不同流量的水位及横断面各分区的水深、流速分布。

1.1.1 推估水位

对于由流量推估水位的计算, PHABSIM 的水力学模型提供 3 种推估水位的方法, 其分别使用 PHABSIM 模型中的 IFG4、MANSQ、WSP 程式, 沿着横切断面去预测水位。

(1) IFG4 法 利用各断面历史水文资料, 推求回归方程式的参数 a 与 b 后, 便可计算河川断面任一流量的水深, 其通式可表示如下:

$$D = aQ^b \quad (1)$$

(2) MANSQ 法 利用渠道某一断面的流量与水深资料, 推求断面的糙度系数(曼宁 n 值), 其公式为均匀流方程式:

$$Q = A \frac{1}{n} R^{2/3} S_0^{1/2} = \frac{1}{n} f(D) A \quad (2)$$

(3) WSP 法 利用缓变流水面线方程式, 并以标准步推法由下游给定一已知水深, 逐一计算上游各断面的水深。

1.1.2 推估流速

对于流速的推估, PHABSIM 提供了下列 3 种方法: 已知速度检定法、速度回归检定法、水深检定法。

当各断面有一组流速值, 可使用已知速度检定法来推估流速; 当有 2 组或 2 组以上的流速值时, 可使用速度回归检定法来推估流速; 若完全没有流速资料时就必须使用水深检定法, 该法针对每一个计算单元, 以曼宁公式为基础, 输入曼宁系数, 求出每一个计算单元的流速, 所依据的公式如下式所示:

$$V = \frac{1}{n} f(D) \quad (3)$$

式中 $f(D)$ 函数会随着断面的地文特性(断面形状与底床特性)而改变。

1.2 栖息地模型

栖息地模型则根据水力学模型计算的不同流量各断面流速与水深分布, 再通过栖息地模型中对象物种的栖息地适应度曲线, 找出横断面各分区的流速与水深所对应的栖息地适应度指数, 便可求得研究河段的权重可使用栖息地面积如下:

$$WUA = \sum_i F[f(V_i), f(D_i), f(C_i)] A_i \quad (4)$$

式中 A_i 为研究河段第 i 分区的水域面积; $f(V_i)$ 、 $f(D_i)$ 、 $f(C_i)$ 分别为第 i 分区的流速、水深、河床底质适应度指数; $F[\]$ 为第 i 分区的组合适度因子(combined suitability factor, CSF)。

PHABSIM 模型提供 4 种 CSF 的计算方法, 分别为

$$(1) \text{ 乘积法} \quad CSF = f(V) f(D) f(C) \quad (5)$$

$$(2) \text{ 几何平均法} \quad CSF = \sqrt[3]{f(V) f(D) f(C)} \quad (6)$$

$$(3) \text{ 最小值法} \quad CSF = \min[f(V), f(D), f(C)] \quad (7)$$

$$(4) \text{ 加权平均法} \quad CSF = k_v f(V) + k_D f(D) + k_C f(C) \quad (8)$$

式(8)中 k_v 、 k_D 、 k_C 分别为流速、水深及河床底质适应度指数的权重因子, 其总和为 1, 决策者可依据实际情况给予不同的权重。

就上述 4 种方法而言, 乘积法是假设 3 种参数 $f(V)$ 、 $f(D)$ 、 $f(C)$ 的适合度指数影响力相同; 几何平均法针对此 3 种适合度指数做几何平均; 最小值法则是取最小的适合度指数当作 CSF 值; 而加权平均法是依据决策者的判断对当地河区的 $f(V)$ 、 $f(D)$ 、 $f(C)$ 各自加权, 再去推求流量与权重可使用栖息地面积的关系, 所以若能完全掌握当地生物特性, 则加权平均法将是最具代表性的方法, 然而本文无法判断此特性, 所以假设 $f(V)$ 、 $f(D)$ 、 $f(C)$ 三者的影响力相同, 因而使用乘积法来推求 CSF。

2 实例研究

本文选取黄河干流中游兰州 - 石嘴山间, 全长 680 km 为研究样区, 采用 PHABSIM 法进行生态流量的推估, 并辅以历史流量法中的 Tennant 法的结果来做比较。

2.1 控制断面和计算时期的选取

控制断面要能基本控制所研究河流的水量, 且要具有需要的观测项目: 水位、流量、大断面等, 同时选取的控制断面要有 10 年以上可利用的观测资料。根据控制断面的选择标准, 本文选择黄河干流中游兰州 - 石嘴山间兰州、安宁渡、下河沿、青铜峡、石嘴山断面做分析研究。

计算时期总体上选择受人类活动干扰较少的时期。由于黄河上游第一座大型水库龙羊峡 1986 年投入运用, 且通过对 1975 - 1985 年上述五断面的汛前断面资料分析, 分别总体保持断面平衡, 因此选择该时期作为本次计算时期。另外, 对黄河干流兰州、安宁渡、下河沿、青铜峡、石嘴山断面, 本文选取 1985 年 5 月 9 日、1985 年 5 月 11 日、1985 年 5 月 8 日、1985 年 5 月 17 日的断面实测资料作为分析的基础。

2.2 对象物种的水深、流速适应度曲线

使用 PHABSIM 模型推求生态流量, 最重要的影响因素是对象物种适应度曲线的建立, 由于此适合度曲线关系到整个栖息地的分布, 因此如何选择一合适的对象物种, 并定义此对象物种的适合度曲线为其关键。本文选取黄河鲤鱼为该研究河段的对象物种, 主要根据该河段水生态系统的食物链结构, 计算水生态系统中各类种群(浮游植物、水草、浮游动物、底栖动物和鱼类)的关键性指数, 比较各类种群的关键性指数的大小, 识别出关键种群; 然后计算种群中物种保护的次序, 优先保护的物种就是对象物种。研究表明, 黄河鲤鱼为该研究河段的对象物种^[9]。另外, 由现场探勘调查, 及从钓客的访谈中发现, 黄河鲤鱼在此研究河段分布的比例相当多。综上, 本文选取此鱼种为该河段的对象物种。

鱼类的生活习性可以由水深、流速、底质、水温、溶解氧等参数反映, 考虑到资料的可获得性, 本文仅将鱼类对流速、水深的喜好性加入研究中, 来表达鱼类栖息地的优劣。根据相关资料^[10], 鲤科类水深和流速适宜度曲线如图 1 和图 2 所示。鲤科类的最佳流速范围为 0.2 ~ 0.6 m/s, 最佳水深范围为 1 ~ 1.5 m。

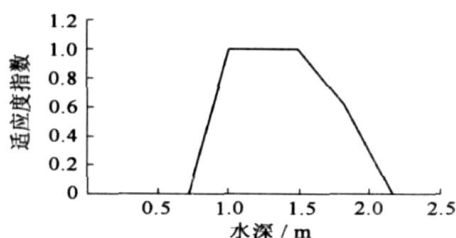


图1 水深~适应度指数关系

Fig.1 Relation between depth and suitability index

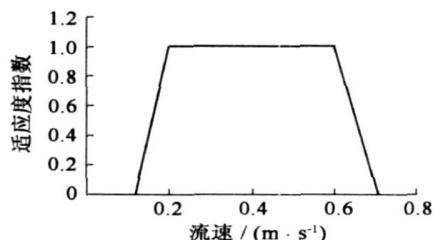


图2 流速~适应度指数关系

Fig.2 Relation between velocity and suitability index

2.3 模拟流量范围的确定

首先对选取的黄河干流中游兰州 - 石嘴山间五个断面(兰州、安宁渡、下河沿、青铜峡、石嘴山)的历年汛前平均实测月流量(1975 - 1985 年)进行统计, 得到其流量范围为 484 ~ 1 224 m³/s, 而流量模拟方面, 由于本文期望对研究河段于时空变化下, 其整体栖息地环境有一完整性的了解, 故流量模拟为 50 ~ 2 000 m³/s, 此模拟流量足以涵盖研究区的实际流量情形。

2.4 权重的确定

在使用 PHABSIM 栖息地模型时, 权重变量会影响栖息地面积的大小, 此值是在计算栖息地面积时对其距离取权重来计算权重可使用栖息地面积。本文假设各断面所代表的栖息地面积, 为距上下游断面河段长各一半的栖息地面积, 亦即在自然河道中各断面的权重取 0.5, 图 3 即是在各个断面权重取 0.5 时栖息地的影响范围

示意图。

2.5 PHABSIM 水力学模型中水位和流速推估方法的选择

PHABSIM 提供了 3 种方法来推估水位, 但原则上对数 - 对数回归法、渠道输送法在每个断面皆需要有一组或一组以上流量-水位资料, 标准步推法无法处理当上游最低河床高度比下游低的情况(深水区)。基于有些资料难以取得的限制, 本文采用对数 - 对数回归法来推估模拟流量状况下的水深。

PHABSIM 提供了 3 种方法来推估流速, 本文因没有流速资料, 所以对于流速的推估采用水深检定法, 由上述 PHABSIM 推估出的水位资料来推算 PHABSIM 中每个测点的流速值。

2.6 生态流量的判别基准

生态流量的判别方式有许多种, 可依据水源运用型态选择适合的评估基准。当以生态发展为唯一目标时, 应选择 WUA 的最大值所对应的流量, 但此时所求出的生态流量太大, 实际操作上根本不能符合其要求, 太过于严苛。所以本文在分析生态流量时, 选取流量 ~ WUA 曲线图的第一个明显转折点(根据斜率变化选取), 以此所对应的流量当作生态所需的基本流量, 即生态流量。

2.7 生态流量的推估

使用黄河鲤鱼适合度曲线与乘积法(式(5))模拟出的兰州、安宁渡、下河沿、青铜峡、石嘴山站的权重可使用栖息地面积, 并绘制成图 4 至图 8 流量与 WUA 的关系曲线图。

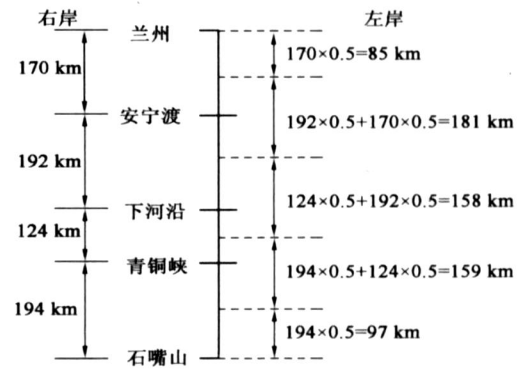


图 3 各断面权重说明

Fig. 3 Diagram of weight for each section

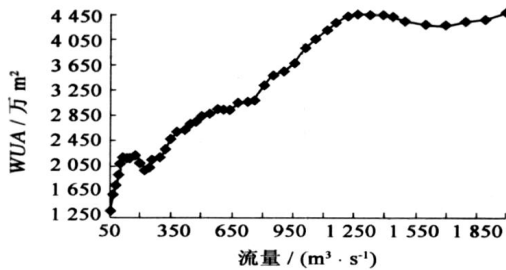


图 4 乘积法兰州断面流量 ~ WUA 关系

Fig. 4 Relation between flow and WUA for Lanzhou cross-section

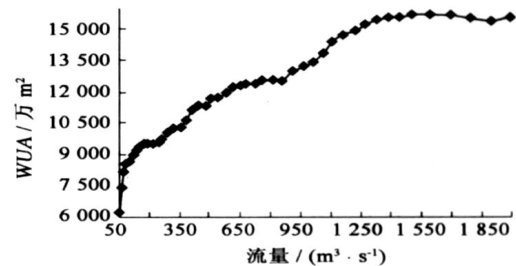


图 5 乘积法安宁渡断面流量 ~ WUA 关系

Fig. 5 Relation between flow and WUA for An ningdu cross-section

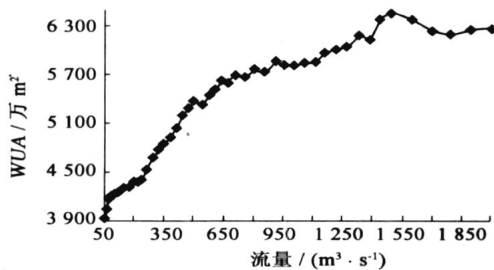


图 6 乘积法下河沿断面流量 ~ WUA 关系

Fig. 6 Relation between flow and WUA for Xiaheyan cross-section

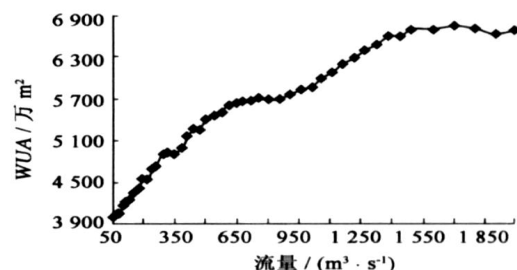


图 7 乘积法青铜峡断面流量 ~ WUA 关系

Fig. 7 Relation between flow and WUA for Qingtongxia cross-section

由图 4 可以发现第一个明显转折点, 其栖息地面积所对应的流量为 $195 \text{ m}^3/\text{s}$; 图 5 第一个明显转折点, 其栖息地面积所对应的流量为 $220 \text{ m}^3/\text{s}$; 图 6 第一个明显转折点, 其栖息地面积所对应的流量为 $220 \text{ m}^3/\text{s}$; 图 7

第一个明显转折点, 其栖息地面积所对应的流量为 $220 \text{ m}^3/\text{s}$; 图8第一个明显转折点, 其栖息地面积所对应的流量为 $175 \text{ m}^3/\text{s}$ 。综上, 采用 PHABSIM 模式所推估出的汛前黄河干流兰州 - 石嘴山间各断面的生态流量如表1所示。

2.8 计算结果与 Tennant 法的比较

Tennant 法为目前国外比较著名的历史流量法, 有时亦称 Montana 法, 乃北美洲政府官方常用的河溪内流量制订方法^[2]。此法以多年平均流量 (mean annual flow, MAF) 为基础, 探讨 MAF 不同百分比流量下河溪内栖息地的状态。Tennant 法假设 MAF 的 10% 流量足够大, 部分水生生物度过短期维持生物栖息地最低限度流量; MAF 的 30% 流量则能维持水生生物良好的生存条件及满足一般的休闲需求。

表1 兰州、安宁渡、下河沿、青铜峡、石嘴山 Tennant 法和 PHABSIM 模式生态流量计算结果 m^3/s

Table 1 Ecological flow for Lanzhou, An ningdu, Xiaheyan, Qingtongxia and Shizuishan cross-sections based on Tennant method and PHABSIM Model

水文站	1975 - 1985 年平均实测流量	Tennant 法		PHABSIM 模式
		10% 平均流量	30% 平均流量	
兰州	1136.4	113.6	340.9	195
安宁渡	1107.5	110.7	332.2	220
下河沿	1114.3	111.4	334.3	220
青铜峡	890.5	89.1	267.2	220
石嘴山	1067.2	106.7	320.2	175

本文采用 1975 - 1985 年多年平均实测流量为基准流量。兰州、安宁渡、下河沿、青铜峡、石嘴山 1975 - 1985 年多年平均实测流量和生态流量如表1所示。由表1可知, 用 PHABSIM 模型推估出的黄河干流兰州 - 石嘴山间兰州、安宁渡、下河沿、青铜峡、石嘴山各断面汛前的生态流量在 Tennant 法所设定的最小和适宜生态流量之间。

3 结 论

用 PHABSIM 模式推估生态流量, 考虑了对象物种对栖息地流速、水深、底质及覆盖物的喜好性, 较其它生态流量计算方法更能反映生物的特性与需求, 也是今后计算水生生物生态需水的发展方向。本文针对黄河干流兰州 - 石嘴山间长 680 km 的河段, 以该河段的关键鱼种黄河鲤鱼为对象物种, 尝试利用 PHABSIM 的水力学与栖息地模型, 以流速及水深二水力学因子进行研究, 探讨对象物种的流量与权重可使用面积的关系。通过对黄河干流兰州 - 石嘴山河段兰州、安宁渡、下河沿、青铜峡和石嘴山各断面 1975 - 1985 年汛前共 11 年生态、水文及断面资料的分析计算, 最后归纳出研究断面汛前适合的生态流量分别为: 195 、 220 、 220 、 220 、 $175 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

用 PHABSIM 模型推估生态流量, 对河流的生态、水文、河道的断面资料要求很高。本文虽然用 PHABSIM 模型对黄河干流兰州 - 石嘴山各断面的生态流量进行了推求, 但很多参数都进行了简化, 如没有考虑河川的底质、水温、溶解氧等参数状况。另外, 河道断面之间的距离过长。因此, 尽管计算出来的结果在 Tennant 法界定的生态流量范围之内, 但流量没有季节分配, 结果过于粗略, 仅供参考。有鉴于此, 建议今后在资料比较完备的情况下, 再进行深入研究, 做进一步推广。

参考文献:

[1] Thame R. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow

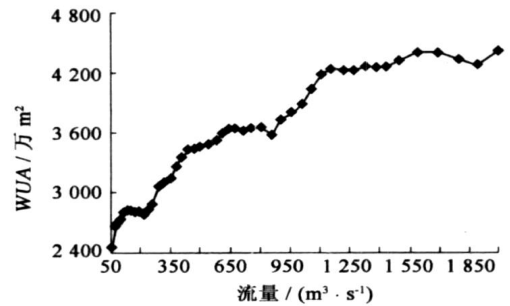


图8 乘法石嘴山断面流量 ~ WUA 关系图
Fig. 8 Relation between flow and WUA for Shizuishan cross-section

- methodologies[J]. *River Research and Applications*, 2003, 19: 397 - 441.
- [2] Tennant D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources[J]. *Fisheries*, 1976, 1(4): 359 - 373.
- [3] Bartschi D K. A habitat-discharge method of determining instream flows to protect fish habitat[A]. *Proceedings of the Symposium and Speciality Conference on Instream Flow Needs*[C]. Texas: American Fisheries Society, 1976. 285 - 294.
- [4] Bovee K D. A comprehensive overview of the instream flow incremental methodology[R]. Wirgina: National Biological Service, Fort Collins Corporation, 1996.
- [5] Bunn S E, Arthington A H. Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity[J]. *Environmental Management*, 2002, 30(4): 492 - 507.
- [6] Hughes D A. Towards the incorporation of magnitude-frequency concepts into the building block methodology used for quantifying ecological flow requirements of south african rivers[J]. *Water South African*, 1999, 5(3): 279 - 284.
- [7] Hughes D A. Providing hydrological information and data analysis tools for the determination of ecological instream flow requirements for south african rivers[J]. *Hydrology*, 2001, 241: 140 - 151.
- [8] Waddle T J, Associates. PHABSIM for Windows: user's manual and exercises[R]. Denver: Midcontinent Ecological Science Center, U S Geological Survey, 2001.
- [9] 蒋晓辉, 刘晓燕, 张曙光, 等. 黄河干流水生态系统关键物种的识别[J]. *人民黄河*, 2005, 27(10): 1 - 4.
- [10] Elizabeth A E. Habitat suitability index models: common Carp[R]. Washington: S Department of the interior, U S Fish and Wildlife Service, 1982.

Study on instream ecological flow based on physical habitat simulation

ZHANG Wen-ge^{1,2}, HUANG Qiang¹, JIANG Xiao-hui²

(1. *Institute of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;*

2. Water Resources Institute of Yellow River Hydraulic Research Academy, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: This paper combines the hydraulic model and the physical habitat simulation model (PHABSIM) to calculate the instream ecological flow by using the Yellow River carp as target species in Lanzhou to Shizuishan reach of the Yellow River mainstream and taking water depth and velocity into consideration. By analyzing the ecological, hydrological and cross-sections data before the flood periods from 1975 - 1985, the ecological instream flows at Lanzhou, An'ningdu, Xiaheyan, Qingtongxia and Shizuishan station calculated by PHABSIM before flood are 195 m³/s, 220 m³/s, 220 m³/s, 220 m³/s, 175 m³/s respectively. And the result is compared with the instream ecological flow calculated by the Tennant method. The results calculated by PHABSIM are within the scope of the those calculated by Tennant.

Key words: stream; ecological flow; physical habitat; depth; velocity; weighted usable area